

El diboruro de magnesio, superconductor a alta temperatura

El diboruro de magnesio desafía los principios que hasta hace muy poco se suponía que cumplían los superconductores óptimos. Con una temperatura crítica cercana a los 40 kelvin, promete una gran variedad de aplicaciones

Paul C. Canfield y Sergey L. Bud'ko

Imagine que en su jardín encuentra una veta de oro o un pozo de petróleo. Una sensación similar de incrédula excitación se extendió sobre la comunidad de físicos del estado sólido durante las primeras semanas de 2001, cuando se anunció que el diboruro de magnesio (MgB_2) se torna superconductor —esto es, conduce la electricidad sin resistencia eléctrica— a temperaturas cercanas a los 40 grados kelvin.

Este compuesto simple se conocía desde el ecuador del siglo pasado, pero había permanecido en los estantes de los laboratorios durante decenios sin que nadie sospechara su valiosísimo potencial. Aunque 40 K (o $-233\text{ }^\circ\text{C}$) pueda parecer una temperatura baja, casi doblaba el récord de los compuestos metálicos (alrededor de 23 K para las aleaciones de niobio, utilizadas extensamente en investigación e industria). En el MgB_2 , la temperatura de transición, o temperatura crítica T_c , se alcanza mediante técnicas harto más baratas que las que requieren las aleaciones de niobio. Entre las posibles aplicaciones del nuevo superconductor se incluyen bobinas superconductoras (imanes) y cables del tendido eléctrico.

A diferencia de los superconductores de altas temperaturas (los óxidos de cobre se tornan superconductores a temperaturas de hasta 130 K), el MgB_2 parece ser un superconductor tradicional, aunque una nueva variante. En la búsqueda de superconductores con temperaturas de transición cada vez superiores, los físicos habían deducido algunas leyes simples que les permitían predecir qué clase de combinaciones químicas podían dar buen resultado. Además, se sospechaba que 23 K era una temperatura de transición muy próxima a la máxima posible en un superconductor normal. Para sorpresa de todos, el MgB_2 desafió dichas leyes e hizo volar por los aires la barrera conceptual que impedía conseguir temperaturas superiores.

Las investigaciones sobre el MgB_2 avanzaron a una velocidad asombrosa. Jun Akimitsu, de la Universidad Aoyama Gakuin en Tokio, anunció su descubrimiento en un congreso a mediados de enero de 2001. Tan sólo dos meses después, se presentaban dos breves intervenciones sobre el tema en la reunión anual de la Sociedad Americana de Física y se habían añadido más de 70 artículos en el sitio de la Red "arxiv.org".

SECCION TRANSVERSAL PULIDA de un segmento de cable de diboruro de magnesio de 0,14 milímetros de diámetro. El cable, compacto, está formado por pequeños granos carentes de orientación que reflejan la luz de modo dispar, dando lugar a varios colores. Este tipo de cables resultan útiles para caracterizar la superconductividad del material.

Esta explosión de actividad obedecía a varias razones. Por un lado, una vez se conoce la receta, es relativamente fácil sintetizar MgB_2 con un buen nivel de pureza. Por otro, en 2001, gracias a Internet, los físicos de la materia condensada nunca habían estado mejor comunicados entre sí. Estos dos ingredientes, combinados con la promesa de un nuevo y simple superconductor de temperatura crítica elevada, propiciaron una mezcla intelectual explosiva.

La confirmación del descubrimiento

Al principio, las noticias del anuncio de Akimitsu se extendieron tan sólo de boca en boca y por correo electrónico. No había disponibles ninguna publicación científica ni borrador electrónico. Cuando la noticia llegó a nuestro grupo, unos pocos días después de la reunión, varias preguntas nos vinieron a la cabeza: ¿Es posible sintetizar bloques sólidos de alta pureza de este material? (El MgB_2 comercial es un polvo de poca pureza.) ¿Es realmente próxima a 40 K su transición superconductor? (Llevábamos casi dos decenios de OSNI, Objetos Superconductores No Identificados, compuestos de los que se había informado que presentaban altas temperaturas de transición, pero que nadie conseguía reproducir.) ¿Conseguiremos averiguar cuál es el mecanismo de la supuesta superconductividad? Y, por fin, ¿podremos esbozar algunas de las propiedades básicas del compuesto? Felizmente,

la respuesta a todas estas cuestiones fue afirmativa.

El rumor del descubrimiento de Akimitsu desató un período de actividad frenética; resultó maravilloso para un gran número de equipos de investigación, entre ellos el nuestro, que está especializado en el estudio de las propiedades físicas de compuestos metálicos. Tan pronto como supimos del informe detuvimos todos los experimentos en curso y acometimos la producción de MgB_2 .

La síntesis del diboruro de magnesio entrañó cierta dificultad inicial. Se trata de un compuesto intermetálico (combinación de dos o más elementos metálicos). El método más sencillo para obtener un producto de este tipo se basa en fundir conjuntamente los elementos que lo componen. Pero no fue posible aplicarlo en este caso ya que las temperaturas de fusión eran muy distintas: 650 °C para el magnesio y mayor que 2000 °C para el boro. Al hervir a unos pocos grados por encima de 1100 °C, el magnesio se evaporaría antes que pudiera formarse el compuesto.

Sin embargo, la vaporización del magnesio sugirió un método alternativo. Introducimos un trozo de magnesio y un poco de polvo de boro en el interior de un recipiente de tántalo, que es inerte; tras sellarlo, lo sometimos a una temperatura suficientemente alta para que el magnesio se fundiera pero no se evaporara (unos 950 °C). El magnesio tiene una presión de vapor relativamente elevada: a 950 °C, un tercio de atmósfera de vapor de magnesio coexiste en equilibrio

con el metal líquido. Esperábamos que este vapor denso se difundiera en el boro sólido, produciendo granos de MgB_2 . En efecto, descubrimos que, tras sólo dos horas, este proceso producía MgB_2 de alta pureza en forma de granos o pellass ligeramente sinterizados (como arenisca). A los tres días de haber oído los rumores sobre el MgB_2 , habíamos hallado un método para producirlo y confirmado su superconductividad a 40 K.

A continuación intentamos averiguar si se trataba de un superconductor clásico, es decir, si su actividad se explicaba mediante la teoría BCS (de las iniciales de los apellidos de sus tres autores: Bardeen, Cooper y Schrieffer), o si pertenecía a un tipo exótico. Si de lo último se tratara, las repercusiones serían las propias de un gran descubrimiento científico. Si resultaba ser un superconductor estándar tipo BCS, debíamos encontrar una nueva explicación a tan elevada temperatura de transición. Con todo, la perspectiva de desarrollar nuevas aplicaciones resultaba de lo más estimulante.

Por razones diversas, varios expertos pensaron que el MgB_2 no era un superconductor tipo BCS común. Antes de que se descubrieran los superconductores de alta temperatura crítica en 1986, la máxima temperatura de transición conocida había permanecido atascada durante dos decenios en alrededor de 20 K. Este hecho condujo a algunos teóricos a sugerir que 30 K era la máxima temperatura crítica posible en superconductores que obedecieran los principios de la teoría BCS. Los óxidos de cobre superconductores de alta temperatura crítica superaban con creces dicho límite, pero no se consideraban superconductores BCS.

Además, la temperatura de transición relativamente alta del MgB_2 violaba uno de los viejos principios que hasta entonces guiaban la búsqueda de compuestos intermetálicos con temperatura crítica (T_c) elevada: cuantos más electrones participen en la transición de fase al estado superconductor, mayor será T_c . Ni el magnesio ni el boro aportaban un gran número de electrones al MgB_2 .

Una prueba experimental directa (basada en la sustitución isotópica) permite comprobar si un superconductor responde a la teoría BCS.

Resumen/El diboruro de magnesio

- En 2001 se descubrió que el MgB_2 , considerado hasta entonces un compuesto anodino, se torna superconductor por debajo de unos 40 K: una temperatura crítica que casi dobla la de otros superconductores similares. Su temperatura operativa máxima se halla entre 20 y 30 K.
- Estas temperaturas pueden conseguirse enfriando el material con neón líquido, hidrógeno líquido o mediante un refrigerador de ciclo cerrado. Tales métodos criogénicos entrañan menores costes y menor complejidad técnica que la refrigeración con helio líquido que se utiliza para las aleaciones de niobio, de amplia aplicación en la industria a unos 4 K.
- Dopado con carbono u otras impurezas, el MgB_2 iguala, si no supera, las aleaciones de niobio en cuanto al mantenimiento de la superconductividad en presencia de un campo magnético y al transporte de corriente eléctrica. Las aplicaciones potenciales incluyen bobinas superconductoras (imanes), cables para el transporte de electricidad y detectores de campo magnético de gran sensibilidad.

Las vibraciones de la red atómica desempeñan una función clave en la teoría. Imaginemos que los iones pesados dotados de carga positiva de la red cristalina están sujetos por muelles (los enlaces químicos). Las excitaciones como las debidas al calor, por ejemplo, provocan la vibración de estos iones a frecuencias características. La teoría BCS predice que la temperatura de transición de un superconductor es proporcional a la frecuencia de las vibraciones de su red. Dado que los cuerpos de menor masa presentan frecuencias características superiores a las de otros cuerpos idénticos pero dotados de mayor masa (pensemos en objetos corrientes como unos vasos de vino o las cuerdas de una guitarra, por ejemplo), si usáramos un isótopo distinto de magnesio o boro obtendríamos MgB_2 con átomos de masa diferente que alterarían las vibraciones de red y, por tanto, modificarían la T_c .

El boro se presenta en la naturaleza en dos formas isotópicas estables: boro 10 y boro 11. Una versión simplificada del modelo BCS predice que la T_c debería diferir en 0,85 K en dos muestras de boro 10 o boro 11 puros. Nuestras primeras muestras sinterizadas de MgB_2 presentaban una diferencia de 1 K. Según la teoría BCS, esta ligera discrepancia entre el valor predicho y el resultado experimental indica que las vibraciones del boro son más importantes para la superconductividad que las del magnesio.

La proximidad de ambas cifras (teórica y experimental) sugiere que el MgB_2 corresponde a un superconductor BCS, si bien se trata de un caso extremo, con una temperatura de transición mayor que cualquier otro de este tipo. Parecía, pues, que la predicción de un límite superior de 30 K para la T_c de un superconductor BCS quedaba refutada. Ello era sin duda una buena noticia, ya que resulta más fácil trabajar con superconductores intermetálicos tipo BCS; por ejemplo, la fabricación de cables es más simple que con los superconductores basados en óxidos de cobre.

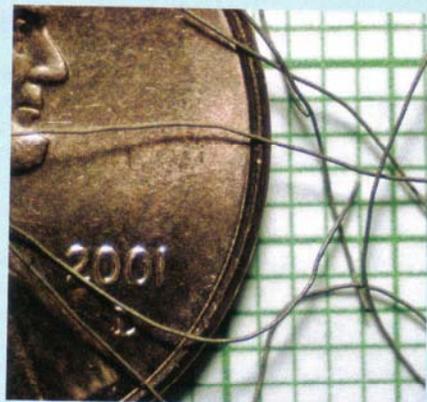
De hecho, caímos en la cuenta de que podían obtenerse cables de MgB_2 a través de la simple exposición de filamentos de boro a una atmósfera de vapor de magnesio. Dichos cables son de mayor utilidad que las pellas

Fabricación de cables

Sólo un par de semanas después del anuncio de la superconductividad del MgB_2 habíamos conseguido diseñar un método para producir segmentos de cable del nuevo superconductor. El MgB_2 se obtiene mediante la reacción de vapor de magnesio con boro: tras varias horas a temperaturas próximas a 1000 °C, el boro absorbe el vapor de magnesio del entorno y se transforma en MgB_2 . En este proceso, el boro se hincha de forma notable, lo mismo que una esponja seca que absorbería vapor de agua del aire en un día húmedo. Para ello se compran fibras de boro de centenares de metros de longitud. Esta técnica se ha aplicado a filamentos con diámetros iniciales de entre 0,1 y 0,3 mm.

Tales segmentos son de gran utilidad para la determinación de las propiedades físicas del MgB_2 . Para aplicaciones prácticas, sin embargo, necesitarían una funda conductora y maleable que prestase soporte estructural. (La funda conductora transportaría también la corriente eléctrica en caso de que el superconductor fallase, impidiendo así un calentamiento catastrófico del MgB_2 .) Una funda así no se ha desarrollado todavía.

Un método más corriente para producir cables se denomina "polvo en un tubo". Consiste en rellenar un tubo con polvo de magnesio y boro o MgB_2 en polvo. Por esa vía se han obtenido muestras de una longitud comprendida entre decenas y centenares de metros.



1. CABLES producidos mediante la reacción de vapor de magnesio y filamentos de boro.



2. SECCION TRANSVERSAL de un cable de diboruro de magnesio roto. Revela en su interior un núcleo central de boruro de tungsteno de 0,015 mm de diámetro.

para el estudio de las propiedades del material y para aplicaciones tales como la construcción de imanes (bobinas generadoras de campo magnético).

Aplicaciones de los superconductores

Aunque se manifiesta sólo a muy bajas temperaturas, la superconductividad ofrece una amplia variedad de aplicaciones, actuales y potenciales. Algunas de las más obvias derivan de la capacidad de los superconductores de soportar el paso de intensas corrientes eléctricas sin merma de energía ni calentamiento resistivo. Por ejemplo, imanes superconductores que producen campos magnéticos

mayores que 20 tesla (alrededor de 500 veces más intenso que el producido por uno de los imanes que tenemos pegados a nuestra nevera). Imanes superconductores como éstos, así como otros de menor intensidad, se usan en laboratorios de investigación y en hospitales, en los equipos de obtención de imágenes por resonancia magnética nuclear. La verdad es que aumenta la venta de estos imanes, construidos a partir de compuestos y aleaciones de niobio.

También se ha propuesto la aplicación de los superconductores en cables de transporte de electricidad sin pérdida de energía, ya que pueden soportar mayores densidades de corriente que los no superconducto-

Historia de la superconductividad

Heike Kamerlingh Onnes descubrió la superconductividad en 1911 mientras utilizaba el helio líquido como refrigerante para estudiar las propiedades eléctricas de los metales a bajas temperaturas. Para sorpresa general, al enfriarse a unos 4,2 K, el mercurio perdía toda su resistencia eléctrica. Este valor umbral de transición al estado superconductor se denomina temperatura crítica, T_c .

Otros superconductores de temperatura crítica incluso superior fueron descubriéndose, de forma lenta aunque firme, en el transcurso de los primeros cinco decenios de la investigación en superconductividad. Correspondían todos a elementos metálicos puros o bien a compuestos intermetálicos (combinaciones de dos o más elementos metálicos). Pero desde mediados de los sesenta hasta mediados de los ochenta el valor máximo de T_c parecía haberse estancado justo por encima de los 20 K.

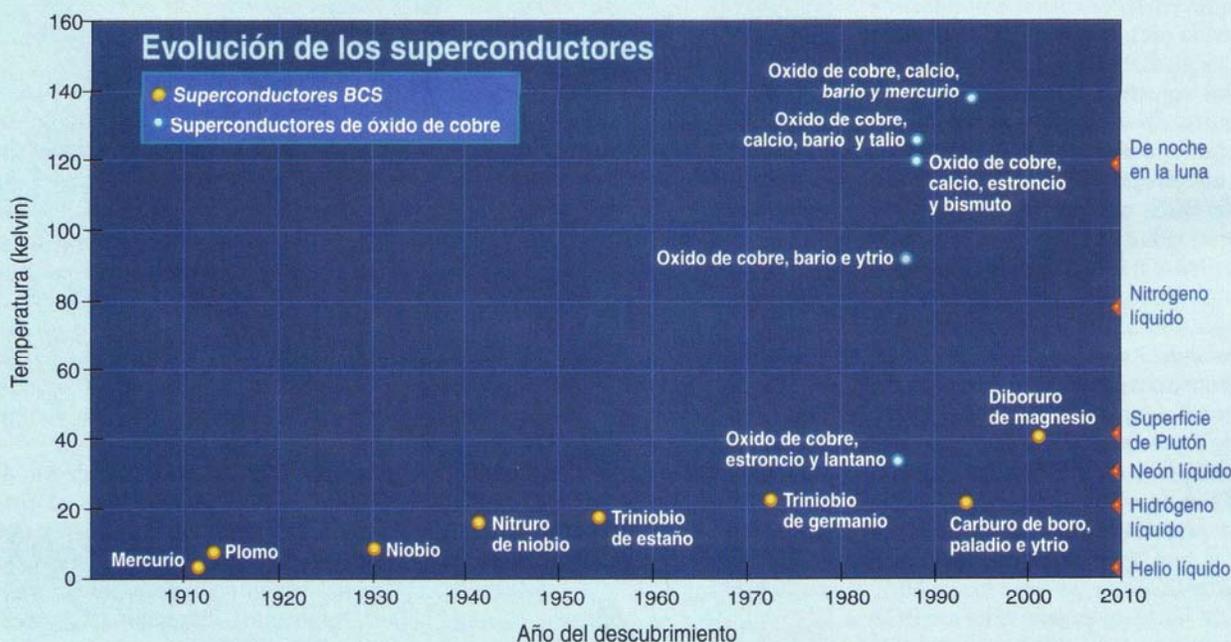
La situación cambió en 1986 con el descubrimiento de la superconducción de alta temperatura en un gran número de compuestos de óxido de cobre. En los primeros años posteriores a este descubrimiento, los valores de T_c se dispararon, alcanzando el óxido de cobre, mercurio, bario y calcio una temperatura crítica de 130 K. Fue un período realmente excitante. Pero pronto se hizo patente que la teoría BCS, la más empleada para describir la superconductividad, no explicaba la ausencia de resistencia en estos materiales. A pesar de un esfuerzo de casi 20 años, todavía no disponemos de una

teoría que explique por qué los compuestos de óxido de cobre son superconductores.

Estos compuestos han planteado múltiples retos. Al principio era difícil producirlos, en formas de alta pureza o monocristales; ello dificultaba la medición de sus propiedades fundamentales. Además, la obtención de cables no resulta fácil: a diferencia de los superconductores intermetálicos, los granos individuales que forman uno de estos óxidos deben estar alineados entre sí para que el cable ofrezca propiedades de interés en ingeniería. Debía encontrarse, pues, una sustancia con unas propiedades parecidas a las de los superconductores intermetálicos, sin dejar de poseer una temperatura crítica notablemente superior a 20 K.

Al amanecer del nuevo milenio, el estado superconductor podía alcanzarse de distintas formas, que variaban en coste y dificultad. La superconductividad en óxidos resultaba útil cerca de 77 K, temperatura que puede alcanzarse con bastante facilidad sumergiendo el material en nitrógeno líquido. Los compuestos intermetálicos más antiguos, tales como el triniobio de estaño, se utilizaban en el laboratorio y en imanes de uso en medicina que operaban a temperaturas próximas a 4 K (alcanzables mediante helio líquido).

En 2001 llegaría el material esperado: se descubrió que el diboruro de magnesio, un sencillo compuesto intermetálico, se tornaba superconductor a 40 K, temperatura crítica que casi dobla la de otros superconductores similares.



res. Hasta la fecha, se han probado con éxito varios prototipos basados en óxidos de cobre, que han sido enfriados a unos 70 K con nitrógeno líquido.

En general, para que un superconductor opere como tal en aplicaciones prácticas es necesario enfriarlo varios grados por debajo de su T_c (aproximadamente entre 0,5 y 0,7 T_c) por una razón obvia: a una temperatura

demasiado próxima a T_c , la superconductividad se destruye con corrientes eléctricas y campos magnéticos intensos. En consecuencia, una T_c de 20 K puede exigir una temperatura de trabajo de 10 K, lo que significa que el superconductor debe enfriarse con helio líquido, una operación costosa y algo compleja.

El MgB_2 atrae el interés de los que se dedican a la investigación aplicada

porque se enfría a las temperaturas operativas con mayor facilidad que las aleaciones basadas en niobio (de T_c inferior) que se utilizan hoy. Puede reducirse la temperatura del MgB_2 con hidrógeno líquido, neón líquido o con un refrigerador de ciclo cerrado, bastante barato, que alcanza fácilmente temperaturas inferiores a 20 K.

Mas para que estos sueños se conviertan en realidad, es necesario que

el MgB_2 ofrece mejores prestaciones superconductoras. Los expertos dedican especial atención a la fase superconductor mixta (en la que un campo magnético aplicado destruye la superconductividad parcialmente), ya que en la mayoría de las aplicaciones el material se encontrará en esta fase.

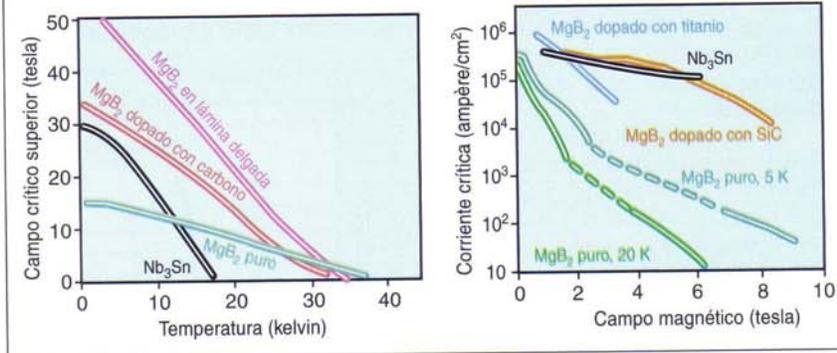
Con un campo magnético débil no se alcanza el estado mixto: el superconductor repele el campo magnético de su interior y se mantiene superconductor. Si el campo es intermedio, en cambio, consigue penetrar en el material en forma de pequeños tubos de flujo magnético denominados "vórtices". En el interior de éstos, el material pierde la superconductividad, pero en su exterior se mantiene superconductor.

Esta fase mixta mantiene gran parte de las propiedades superconductoras útiles. Al aumentar la intensidad del campo magnético aplicado, el porcentaje de material ocupado por los tubos de flujo aumenta hasta que éstos se superponen completamente, de forma que todo el material se torna no superconductor. La intensidad del campo a la que se pierde la superconductividad se denomina campo crítico superior; constituye una propiedad clave, pues determina la utilidad práctica del superconductor.

En su mayoría, las aplicaciones utilizarán campos magnéticos intermedios (suficientemente intensos para que el material resulte operativo, pero no hasta el punto de que destruyan la superconductividad). El objetivo consiste, pues, en maximizar los intervalos de temperatura y campo magnético en los que la fase superconductor mixta sobrevive. La temperatura desempeña también una función relevante en estas consideraciones, dado que el campo crítico de un superconductor depende de la misma. Justo por debajo de T_c , el campo crítico es casi cero, es decir, incluso el campo más débil destruye la superconductividad. A temperaturas inferiores, la superconductividad resiste campos de mayor intensidad.

Afortunadamente, el campo crítico superior de un material puede modificarse alterando la composición del mismo: en general, añadiendo impurezas. Por ejemplo, la sustitución de una parte del boro del MgB_2

Mantener el estado superconductor en el seno de un campo magnético y al paso de una corriente eléctrica resulta crucial en las aplicaciones prácticas de los materiales superconductores. Los datos representados aquí muestran cómo el dopaje con impurezas mejora el comportamiento del MgB_2 : consigue igualar o incluso exceder las prestaciones del triniobio de estaño (Nb_3Sn), el preferido por la industria. La gráfica de la izquierda muestra que un cable de MgB_2 dopado con carbono y una lámina delgada de MgB_2 con un nivel de impurezas desconocido soportan un campo magnético de mayor intensidad ("campo crítico superior") que el Nb_3Sn a cualquier temperatura. La gráfica de la derecha (tomada a 4 K, excepto donde se diga otra cosa) muestra que el MgB_2 dopado con carburo de silicio (SiC) iguala en capacidad de transporte de corriente eléctrica al Nb_3Sn , si bien otras variantes ofrecen peor comportamiento. (Las líneas discontinuas corresponden a interpolaciones.)



por carbono mejora drásticamente su campo crítico superior. Nuestro grupo y otros han demostrado que con una sustitución del 5 por ciento de carbono se dobla el campo crítico superior del MgB_2 , lo que supone una gran mejora en muestras masivas.

Además, el grupo de David C. Larbalestier, de la Universidad de Wisconsin-Madison, ha demostrado que las capas delgadas de MgB_2 presentan valores de campo crítico superior aún mayores, que superan incluso los del triniobio de estaño (Nb_3Sn). Estos datos sobre la capa delgada plantean una serie de cuestiones: ¿qué es lo que da lugar a tan altos valores? ¿Serán pequeñas cantidades de oxígeno? ¿Quizás algún otro elemento que se introduce y lo dopa de forma desconocida? ¿O se deben a las tensiones en la estructura del MgB_2 en la capa delgada? Cualquiera que sea la respuesta, el MgB_2 se presenta claramente como un material prometedor para la construcción de bobinas superconductoras (imanes) que operen a temperaturas superiores y quizás incluso bajo la acción de campos más intensos que el Nb_3Sn , el compuesto preferido en la actualidad para este tipo de imanes.

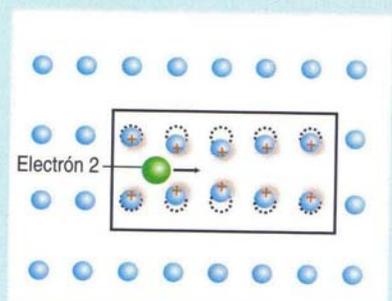
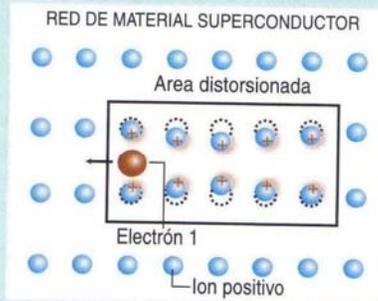
La segunda propiedad superconductor de especial interés para la física aplicada es la densidad de corriente crítica. Define ésta la máxima cantidad de corriente que puede transportar un superconductor manteniendo nula su resistividad. Cuando la densidad de corriente supera a la densidad de corriente crítica los vórtices (las pequeñas regiones no superconductoras de la muestra) comienzan a moverse y se produce una pérdida de energía: el material ofrece entonces una resistencia no nula. Para contrarrestar este efecto los vórtices pueden ser anclados clavados introduciendo el tipo adecuado de defecto (estructural) en el superconductor. A menudo, este anclaje puede potenciarse reduciendo el tamaño de los cristallitos individuales (o granos) del material, puesto que ello aumenta el área superficial asociada con las fronteras de grano que es donde se anclan los vórtices. Otro método para aumentar el anclaje consiste en introducir inclusiones microscópicas de un segundo material como el óxido de ytrio o el diboruro de titanio.

Incrementar la densidad de corriente crítica a campos magnéticos superiores constituye uno de los mayores

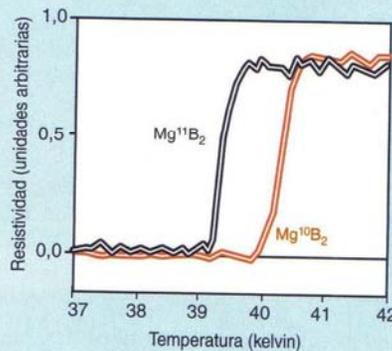
Predicciones de la teoría BCS

En 1957, los físicos John Bardeen, Leon N. Cooper y J. Robert Schrieffer propusieron un modelo para explicar el mecanismo que subyace en la superconductividad de los metales: la teoría BCS (denominada así por las iniciales de sus apellidos). En un metal no superconductor, los electrones son dispersados por defectos e imperfecciones estructurales; así se genera la resistencia. La superconductividad, en cambio, tiene lugar (de acuerdo con la teoría BCS) cuando los electrones se comportan como una sola entidad colectiva extensa que se mueve sin dispersarse.

Los elementos constructivos de este nuevo estado electrónico son los pares de Cooper: pares de electrones en los que cada uno es atraído ligeramente por el otro. Esta atracción entre dos partículas de carga idéntica —que a primera vista parece imposible— ocurre porque el metal está compuesto por iones dotados de carga positiva, además de por electrones. Cuando un miembro del par de Cooper se mueve a través del metal, deja en su estela una distorsión de carga positiva. Esta efímera carga neta positiva atrae al segundo electrón. De esta forma, la distorsión de la red acopla ligeramente a los electrones. (Para ser más precisos, en el acoplamiento están implicadas las vibraciones de red de una frecuencia determinada.) Podríamos compararlo al movimiento de dos niños en una cama elástica: aunque no existe atracción directa entre ellos, tienden a botar uno hacia el otro debido a la distorsión que producen en la lona bajo sus pies.



1. LA FORMACION DE PARES DE COOPER (pares de electrones acoplados) da lugar a la superconductividad. Al moverse un electrón a través de un metal, deja en su estela una distorsión de la red de iones dotados de carga positiva (*izquierda*). Poco después, el segundo electrón es atraído por la resultante concentración de carga positiva (*derecha*). De ello resulta una débil atracción mutua entre los dos electrones.



2. LA RESISTIVIDAD ELECTRICA del MgB₂ desaparece al enfriarse el material por debajo de su temperatura crítica, próxima a 40 K. La temperatura crítica de muestras sintetizadas con isótopos de boro puro 10 y 11 es distinta. Este desplazamiento isotópico queda explicado por la teoría BCS. De ello se infiere que la superconductividad del MgB₂ es la tradicional, del tipo BCS.

Los pares de Cooper se solapan entre sí. Por debajo de la temperatura crítica (T_c) forman un estado electrónico extenso que ya no encuentra resistencia eléctrica alguna.

Una versión simplificada de la teoría BCS predice que la T_c depende de tres propiedades del material: el número de electrones que participan en el estado superconductor (cuantos más electrones participen, mayor es T_c), la frecuencia característica

de las vibraciones de red involucradas en el acoplamiento de los electrones del par de Cooper (a mayor frecuencia, mayor T_c) y la intensidad del acoplamiento entre la distorsión de red y los electrones (a mayor acoplamiento, mayor T_c). Durante decenios, la búsqueda de una T_c superior se centró en la optimización de estas tres propiedades relacionadas, sobre todo las dos primeras. El MgB₂ parece tener una T_c más alta en razón de un mayor acoplamiento electrón-red, es decir, en virtud de la tercera propiedad.

retos actuales para convertir el MgB₂ en un superconductor operativo. La densidad de corriente crítica del MgB₂ es comparable a la del Nb₃Sn a bajos campos magnéticos, pero decae más rápidamente a campos de mayor intensidad. Ello dificulta la utilización del MgB₂ en bobinas diseñadas para crear un campo magnético de gran intensidad. Con todo, desde el descubrimiento de la superconductividad en este compuesto hace cuatro años, se han logrado mejoras notables en la densidad de corriente crítica, en su valor a campos bajos y —quizá lo más importante— a campos altos. La investigación en

este sector se encuentra en plena ebullición: parece que pronto se logrará optimizar las prestaciones superconductoras del MgB₂.

Pasado, presente y futuro

Resultado de decenios de investigación, el descubrimiento de la superconductividad en el MgB₂ nos recuerda que la naturaleza no siempre cumple los principios que establecemos en nuestros intentos —con frecuencia vanos— de describirla. Aunque el MgB₂ se descubrió hace más de 50 años, nunca se había comprobado si era superconductor, en parte porque no se ajustaba a nuestra

idea de superconductor intermetálico. Afortunadamente, en la búsqueda de nuevos materiales y nuevas propiedades, la voz de la naturaleza todavía puede oírse a pesar del estruendo de nuestros prejuicios.

En los últimos cuatro años, la comprensión de la superconductividad del MgB₂ ha avanzado a velocidad de vértigo. Tenemos una clara idea de las propiedades del MgB₂ de alta pureza. Ahora estamos aprendiendo a modificar el material para mejorar los intervalos de campo magnético y densidad de corriente en que resulta útil. Las propiedades físicas a 20 o 30 K han mejorado hasta tal

punto, que podrían desarrollarse aplicaciones del tipo de densidad de corriente alta, así imanes (bobinas), que pueden refrigerarse con hidrógeno líquido, neón líquido o con un refrigerador de circuito cerrado. Ya se han conseguido prototipos de cables recubiertos e incluso algunas bobinas, pero todavía queda mucho trabajo por hacer: optimizar las propiedades de los superconductores y comprender mejor su metalurgia así como la de los posibles materiales de recubrimiento de los cables.

Con todo, el futuro del MgB_2 parece bastante prometedor. De producirse un cambio hacia una economía basada en el hidrógeno, el MgB_2 podría desarrollar su verdadero potencial. Si van a generarse grandes cantidades de hidrógeno, en los pequeños reactores de lecho granular [véase "Nueva generación de la energía nuclear", por James A. Lake, Ralph G. Bennett y John F. Kotek; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo 2002], por ejemplo, ese hidrógeno debería transportarse de alguna manera. Para ello podría recurrirse a tubos aislados térmicamente que permitan transportar el líquido manteniendo la temperatura por debajo de la temperatura de ebullición del hidrógeno (20 K). Estas tuberías ofrecerían un sistema criogénico para cables de transporte de electricidad sin pérdidas hechos de MgB_2 que compartieran el espacio en el interior del tubo aislado térmicamente. (Aunque pueda sonar a fantasía científica, no a genuina ingeniería, tal sistema ya ha sido propuesto para su desarrollo.)

Tras el descubrimiento del primer superconductor de óxido de cobre, se han hallado decenas de otros óxidos de cobre superconductores. Sin embargo, cuatro años después del descubrimiento del MgB_2 no se ha encontrado ningún otro compuesto relacionado que muestre una T_c anormalmente elevada. El hallazgo de la superconductividad en los óxidos podría compararse con el descubrimiento de todo un continente provisto de inmensos espacios que explorar. La superconductividad del MgB_2 , en cambio, vendría a ser como una isla algo separada de un archipiélago ya explorado. No sabemos si éste es el último eslabón de una cadena o si el futuro nos depara todavía más sorpresas.

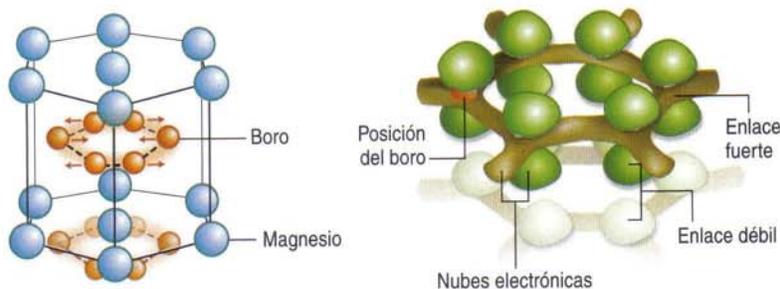
Estructura y enlaces

Una de las principales causas de la temperatura de transición sorprendentemente elevada del MgB_2 es la intensidad del acoplamiento entre los electrones y las vibraciones de red. Tal interacción surge de la especial estructura química del material.

En el MgB_2 , los átomos de boro forman una red hexagonal en panel de abeja (rojo, a la izquierda). Estas capas de boro están separadas por capas de magnesio (azul). Los electrones responsables de la conductividad normal así como de la superconductividad están asociados a las capas de boro. Participan en uno de los dos tipos de enlace que hay en el material (derecha): los átomos de boro que integran la red hexagonal están unidos mediante un enlace fuerte; entre las distintas capas de boro existe un segundo enlace, más débil.

Los electrones de conducción de los enlaces planos son muy sensibles a las vibraciones en el plano (flechas, izquierda). Esta fuerte interacción, o acoplamiento, da lugar a un estado que permanece superconductor a temperaturas elevadas.

El MgB_2 ha revitalizado una pregunta básica de lo más excitante en física: ¿Es posible un tipo de superconductividad debida a dos colectividades de electrones (verde y marrón), que formen dos mares distintos de pares de Cooper? Los datos experimentales sugieren que el MgB_2 constituiría el primer ejemplo de este fenómeno.



Los autores

Paul C. Canfield y Sergey L. Bud'ko trabajan en el Laboratorio del Departamento de Energía en Ames, Iowa. Canfield es profesor de física y astronomía en la Universidad estatal de Iowa. Centra su investigación en el diseño, descubrimiento, crecimiento y caracterización de nuevos materiales y fenómenos, principalmente de compuestos metálicos a bajas temperaturas. Bud'ko estudia las propiedades termodinámicas, magnéticas y de transporte de nuevos materiales, las oscilaciones cuánticas en metales y semimetales, y las propiedades físicas de materiales en condiciones extremas que combinan altas presiones, campos magnéticos intensos y bajas temperaturas. Los autores reconocen agradecidamente su fructuosa colaboración con R. Wilke, D. Finnemore, C. Petrovic, G. Lapertot, M. Angst, R. Ribeiro y N. Anderson.

Bibliografía complementaria

- SUPERCONDUCTIVITY AT 39 K IN MAGNESIUM DIBORIDE. Jun Nagamatsu et al. en *Nature*, vol. 410, págs. 63-64; 1 de marzo, 2001.
- MAGNESIUM DIBORIDE: ONE YEAR ON. Paul C. Canfield y Sergey L. Bud'ko en *Physics World*, vol. 15, n.º 1, págs. 29-34; enero, 2002.
- ENERGY FOR THE CITY OF THE FUTURE. Paul M. Grant en *Industrial Physicist*, vol. 8, n.º 1, págs. 22-25; febrero/marzo 2002.
- MAGNESIUM DIBORIDE: BETTER LATE THAN NEVER. Paul C. Canfield y George W. Crabtree en *Physics Today*, vol. 56, n.º 3, págs. 34-40; marzo, 2003.
- SUPERCONDUCTIVITY IN MgB_2 : ELECTRONS, PHONONS AND VORTICES. Dirigido por Wai Kwok, George W. Crabtree, Sergey L. Bud'ko y Paul C. Canfield, en *Physica C*, vol. 385, n.ºs 1-2; marzo, 2003.